城市大气污染的空间传导网络与动态交互影响*

刘华军[1]，陈明华[1]，孙亚男[2]，刘传明[1]

（1. 山东财经大学经济学院， 山东 济南 250014；
2. 山东财经大学工商管理学院，山东 济南 250014）

［摘要］ 大气污染的区域性特征给大气污染有效防治提出了严峻挑战，创新大气污染联防联控体系以形成跨区域治污合力势在必行。本文基于京津冀、长三角和珠三角等10个城市群245个城市2015年空气质量指数（AQI）日报数据，从时间序列数据的研究视角揭示了城市大气污染的空间传导网络结构特征及动态交互影响。研究发现，大气污染在城市群内部和城市群之间均具有多线程的空间传导关系且呈现出联系紧密的复杂网络结构形态。受此网络结构的影响，谋求多中心、跨区域的大气污染联防联控组织体系尤显关键；城市群大气污染主要来源于城市群内部，与此同时大气污染在城市群之间也存在较强的交互影响。基于上述结论，本文提出了全局视野下大气污染联防联控体系创新思路，即通过构建一个以城市群核心城市为中心的、“城市-城市群-地区”不同层次协同的跨区域大气污染联防联控体系，为大气污染的跨区域协同治理提供组织保障。

［关键词］ 大气污染； 空间传导网络； 动态交互影响； 城市群

［中图分类号］ X82 **［文献标识码］** A **［文章编号］**

一、问题提出

当前，中国已经成为世界上大气污染最严重的地区之一。在中国最大的500个城市中，只有不到1%达到了世界卫生组织推荐的空气质量标准，在世界上污染最严重的10个城市中，有7个在中国 [1]。而经济发达、人口密集的京津冀、长三角、珠三角等城市群已经成为中国大气污染的重点区域。尤其是2015年12月以来，华北地区多次出现大面积的严重雾霾天气，多个城市连续启动了霾红色预警。更为严峻的是，伴随城市规模的不断扩张，区域内城市连片发展，在大气环流及大气化学的双重作用下，区域间大气污染相互影响愈发明显，区域性大气环境污染问题日益突出。面对区域性大气污染的严峻现实，加强区域联防联控成为中国重点区域防治大气污染的“新

［收稿日期］ 2016-06-16

［基金项目］ 国家社会科学基金项目“资源环境约束下全要素生产率增长的空间差异及区域协调对策研究”（批准号：13CJL069）；山东省自然科学基金项目“基于SNA产学研合作协同创新网络风险演化与仿真”（批准号：ZR2013GQ004）。作者感谢山东财经大学经济学院杜广杰、何礼伟同学出色的数据整理工作。

［作者简介］ 刘华军（1979-），男，山东广饶人，山东财经大学经济学院教授，经济学博士；陈明华（1978-），男，山东苍山人，山东财经大学经济学院副教授，经济学博士；孙亚男（1980-），男，山东蓬莱人，山东财经大学工商管理学院副教授，管理学博士；刘传明（1990-），男，山东茌平人，山东财经大学经济学院硕士研究生。通讯作者：刘华军，电子邮箱：huajun99382@163.com。

常态”。目前，京津冀、长三角、珠三角等城市群已经初步构建起大气污染联防联控机制，2015年上海、天津、安徽、江苏多个省份也陆续制定实施了省级层面的大气污染防治条例。然而，在大气环流以及经济发展等因素的作用下，大气污染的空间相互影响已经超越了纯粹地理学意义上的邻近效应，大气污染在相邻更远距离的区域之间也可能存在空间传导，加之区域内城市联片发展，大气污染在区域内部多个城市之间的传导就会组成一个多线程的复杂网络，而且大气污染的空间传导不仅局限于城市间，城市群之间大气污染也可能存在交互影响。面对大气污染的空间传导和交互影响，亟需创新大气污染联防联控体系以形成跨区域治污合理。

根据最新的研究进展，对于大气污染的空间交互影响主要涉及以下三个分支：基于不同的空气质量模型对大气污染跨城市传输进行数值模拟[2-5]、基于空间统计技术刻画大气污染的空间分布和空间关联特征[6-8]、将时间序列统计和计量经济技术拓展应用于大气污染领域，描述大气污染的是时间变动规律并揭示区域（城市）大气污染的相互影响[9-13]。上述研究尽管部分地揭示出大气污染在某些特定城市间的跨界传输和相互影响，然而受到方法和数据的限制，现有研究并未从全局视角揭示城市大气污染空间传导的整体网络结构特征和区域间的动态交互影响，这无疑降低了现有研究的价值。与已有研究不同，本文以京津冀、长三角和珠三角等 10 大城市群及 245 个城市为研究对象，采用 2015 年国家环境保护部（简称环保部）发布的城市空气质量指数（Air Quality Index, AQI）日报数据，在时间序列分析框架下，在向量自回归（VAR）框架下构建了大气污染的空间传导模型，从城市群内部和城市群之间大气污染的空间传导关系进行有效识别，在此基础上，构建大气污染空间传导网络模型并首次运用社会网络分析（SNA）方法揭示大气污染空间传导网络的结构特征。同时，运用广义脉冲响应函数和方差分解技术对大气污染在城市群之间的动态交互影响进行了实证考察，最终提出了构建大气污染联防联控体系的创新思路。

二、模型构建与样本数据

1. 时间序列视角下大气污染的空间交互影响模型

根据经济学中空间相互作用理论以及圈层结构理论，区域（城市、城市群）之间在经济、社会等诸多领域均存在一定的联系，而且伴随区域开放不断深化，城市或区域之间的空间关联日益紧密，这已经被大量经验研究文献所证实[14-17]，而且区域之间的空间关联不仅仅体现在经济方面，在能源、环境领域的联系也日趋紧密[18-19]。对于大气污染的空间联系，环境科学领域的大量基于空气质量模型的研究已经表明污染物是可以实现跨界传输，在大气环流以及经济发展等因素的作用下，城市间大气污染的相互影响不仅体现在排放量巨大的一次污染物在距离较近的城市之间输送、转化和耦合，而且某些污染物尤其是形成 $PM_{2.5}$ 的污染物可以跨越城市甚至省际的行政边界而实现远距离输送[2]，这就意味着大气污染不再是发生在单个区域的孤立的污染现象，大气污染在区域之间存在一定相关性[9]，在大气环流等自然条件的作用下，大气污染往往会在区域间传导，某个区域的大气污染可能会成为另一区域大气污染的诱因，或加剧另一区域大气污染的程度，这为从时间序列的研究视角探索大气污染的空间传导提供了新的契机。

从时间序列数据角度，一个区域大气污染的变动可能引起其他区域大气污染的变动，换言之，某个区域大气污染可能“领先”（precede）于其他区域，因此该区域对其他区域的大气污染具有

“预测”能力。本文构造 VAR 模型来揭示对区域大气污染之间动态交互关系。

考虑两个城市 x、y 大气污染的时间序列分别为$\{x_t\}\{y_t\}$，为了检验两个城市之间的大气污染是否动态交互影响，构造下面两个 VAR 模型①：

$$x_t = \alpha_1 + \sum_{i=1}^{m} \beta_{1,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{1,i} y_{t-i} + \varepsilon_{1,t} \quad (1)$$

$$y_t = \alpha_2 + \sum_{i=1}^{p} \beta_{2,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^{q} \gamma_{2,i} y_{t-i} + \varepsilon_{2,t} \quad (2)$$

在上述模型中，α_j、β_j、γ_j（j=1,2）为待估参数，$\{\varepsilon_{j,t}\}(j=1,2)$为残差项，满足$\{\varepsilon_{j,t}\}\sim N(0,1)$。$m$、$n$、$p$、$q$ 为自回归项的滞后阶数。方程（1）检验的是 x 的大气污染是否受到自身以及城市 y 大气污染滞后期的影响；方程（2）则检验 y 的大气污染是否受到自身以及城市 x 大气污染滞后期的影响。在 VAR 模型框架下，通过对自回归项系数的联合显著性检验进而对变量间动态交互关系进行检验。若方程（1）中虚拟假设 H_0：$\gamma_{1,1}=\gamma_{1,2}=\ldots=\gamma_{1,n}=0$ 被拒绝，则意味着 y 的滞后值有助于解释 x，即 y“领先”于 x，两个城市大气污染的传导关系可以直观地表示为“$y\rightarrow x$”。同理，若方程（2）中虚拟假设 H_0：$\gamma_{2,1}=\gamma_{2,2}=\ldots=\gamma_{2,q}=0$ 被拒绝，则意味着 x 的历史值有助于解释 y，即 x “领先”于 y，两个城市大气污染之间的传导关系可以表示为“$x\rightarrow y$”。若上述两个方程中的原假设均被拒绝，则表明 x 和 y 之间存在双向交互关系，两个城市大气污染之间的传导关系可以表示为“$x\leftrightarrow y$”。这一检验思想实际上与格兰杰因果检验是一致的。其中，“$y\rightarrow x$”意味着 y 是 x 的格兰杰因；“$x\rightarrow y$”意味着 x 是 y 的格兰杰因，“$x\leftrightarrow y$”则意味着 x 和 y 之间互为格兰杰因果。在 VAR 框架下，除了通过格兰杰检验揭示大气污染的空间传导关系之外，还可以通过广义脉冲响应函数和方差分解揭示大气污染的空间动态交互影响及其贡献度，其中，广义脉冲响应函数提供了某个区域大气污染受其他区域冲击所产生响应的正负方向、调整时滞和稳定过程等信息。方差分解则通过分析每一个结构冲击对区域大气污染变化的贡献度，定量地把握区域大气污染之间的影响关系。最后需要指出，上述检验均适用于平稳序列，对于非平稳序列需要进行差分直至平稳后再进行检验。

2. 大气污染空间传导的网络结构特征刻画：社会网络分析方法②

在城市群内部，多个城市大气污染之间的空间传导关系将形成复杂的多线程网络，同样的，大气污染在多个城市群之间也将形成空间传导网络。社会网络分析（SNA）为揭示大气污染空间传导的复杂网络结构特征提供了可行工具。社会网络分析以“关系”（relation）作为基本分析单位，采用图论工具、代数模型技术描述关系模式并探究这些关系模式对结构中成员或整体的影响，是一种针对“关系数据”的跨学科分析方法，近年来其应用领域已经逐渐从社会学向经济学、管理学等领域拓展[16-19]，成为一种新的研究范式[20-24]。本文将借助 SNA 工具来刻画城市群内部和城市群之间大气污染空间传导的网络结构特征。

3. 样本数据

本文以空气质量指数（AQI）作为衡量城市环境污染的指标③。根据环保部发布的《环境空气

① 该模型同样适合城市群的空间传导关系识别。

② 限于篇幅，具体公式没有给出，有需要的读者可以参见刘军（2014）及其他相关文献。

③ 2013 年及之前，我国评价空气质量的指标是 API（Air Pollution Index），该指标按照《环境空气质量标准》

质量指数（AQI）技术规定（试行）》（HJ633-2012），AQI 是定量描述空气质量状况的无量纲指数，它综合考虑了二氧化硫、二氧化氮、PM_{10}、$PM_{2.5}$、一氧化碳、臭氧等多种污染物，是衡量空气质量的综合指标。根据环保部 2012 年 2 月 29 日发布的《关于实施<环境空气质量标准>（GB3095-2012）的通知》（环发[2012]11 号），2012 年至 2014 年，环保部组织分三个阶段完成了在全国 338 个地级及以上城市的空气质量新标准监测实施工作。本文以实施新空气质量标准的京津冀、长三角、珠三角、成渝、长中游、山东、东北、中原、关中、晋中等 10 个城市群 245 个城市为研究样本（详见附录 I）。全部城市样本的 AQI 数据来源于采用环保部数据中心发布的空气质量指数日报数据（http://datacenter.mep.gov.cn/）。缺失值按照插值法补全。经过插值处理后的全部数据的时期跨度为 2015 年 1 月 1 日-2015 年 12 月 31 日共 365 天，全部观测值为 365×245=89425 个。此外，城市群 AQI 以该城市群内部所有城市 AQI 的算术平均值来衡量。

三、中国城市大气污染的空间分布格局

1. 中国大气污染的空间可视化

本文基于环保部发布的 2015 年城市 AQI 日报数据（共 316 个城市），测度了所有城市 AQI 的年度均值，并以城市 AQI 年度均值为指标，在 ArcGIS 平台支持下，对中国城市大气污染状况进行了空间可视化，如图 1 所示。根据图 1，可以比较直观地发现，中国城市大气污染的空间分布呈现三个明显特征：①大气污染以城市群为单位呈现明显的空间集聚特征，这与城市群的人口密度和经济规模是高度耦合的。②京津冀及周边地区污染最为严重，而且京津冀的大气污染和山东、关中、中原、晋中、东北等城市群之间呈连片蔓延趋势。③长江以南的地区空气质量要优于长江以北，这可能与长江以北地区燃煤有关。不过也注意到，长江沿岸的长三角、长江中游以及成渝城市群的污染也是比较严重的。

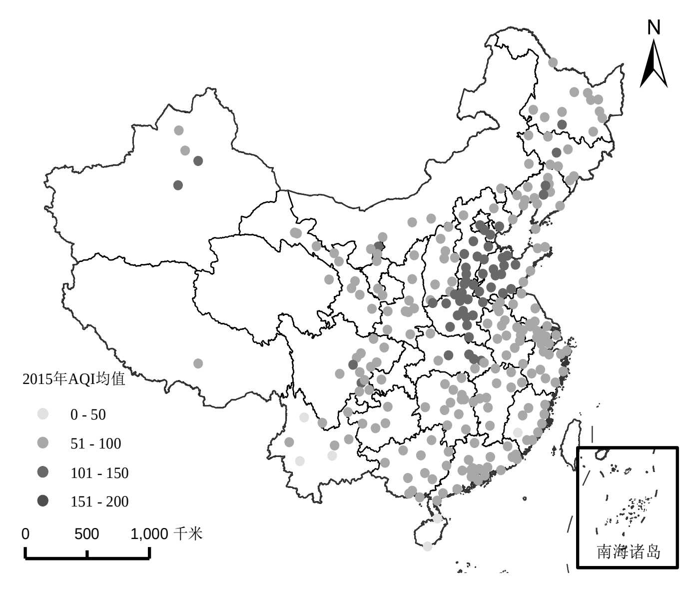


图 1 中国城市大气污染的空间分布

资料来源：作者绘制。

（GB3095-1996），仅考虑了 SO_2、NO_2 和 PM_{10} 等 3 项指标。2013 年之后，伴随环境空气质量标准（GB3095-2012）的实施，AQI 取代了 API，成为城市空气质量的评价指标。

2. 中国城市大气污染的基本状况

根据城市 AQI 日报数据，2015 年十大城市群全部 254 个城市样本 AQI 全年均值为 91，平均达标天数为 262 天，平均达标比例为 71.78%。从城市群大气污染的具体状况看，在 10 个城市群中，京津冀、中原和山东等三个城市群的 AQI 全年均值超过 100，污染较为严重；珠三角城市群的 AQI 全年均值仅为 60，空气质量相对较好。从空气质量平均达标天数看，中原和京津冀城市群空气质量的平均达标天数低于 200 天，两个城市群空气质量平均达标比例分别为 49.88 和 52.58%，也就是说，它们全年有 1 半左右的天数处于污染当中，空气状况特别恶劣。而珠三角城市群空气质量的平均达标天数为 333 天，达标比例达到 91.36%。其他城市群的空气质量平均达标天数均高于 250 天，达标比例处于 70%以上。从重度及以上污染天数看，京津冀、中原、山东等三个城市群的重度及以上污染天数分别为 36 天、29 天和 22 天，而珠三角全年没有重度及以上污染情况。从 2015 年 12 月份城市群大气污染情况看，京津冀的污染状况最为恶劣，重度及以上污染天数占比达到 33.33%，此外，中原和山东城市群污染也比较严重，重度及以上污染天数分别达到 11 天和 9 天，而长三角、长中游、成渝城市群的污染相对较轻。

表 1　　十大城市群大气污染的基本状况

城市群	平均AQI	平均达标		重度及以上污染		2015 年 12 月		城市群中心城市		
		天数	比例%	天数	比例%	平均达标天数	重度及以上污染天数及占全年比重	城市	AQI	排名
京津冀	115	192	52.58	36	9.88	11	12（33.33%）	北京	123	228
长三角	86	270	73.96	8	2.17	16	3（37.50%）	上海	90	136
珠三角	60	333	91.36	0	0.04	30	0（-）	广州	71	48
成　渝	82	284	77.88	11	3.04	21	2（18.18%）	重庆	82	89
长中游	81	283	77.52	7	1.90	20	1（14.29%）	武汉	105	205
山　东	104	215	58.83	22	6.16	11	9（40.91%）	济南	130	238
东　北	83	279	76.48	13	3.62	18	3（23.08%）	沈阳	110	213
中　原	115	182	49.88	29	8.04	8	11（37.93%）	郑州	135	241
关　中	89	279	76.47	14	3.75	12	6（42.86%）	西安	97	179
晋　中	91	256	70.11	12	3.29	12	6（50.00%）	太原	96	172
全部城市	91	262	71.78	13	3.56	17	5（38.46%）	-	-	-

资料来源：作者整理绘制。

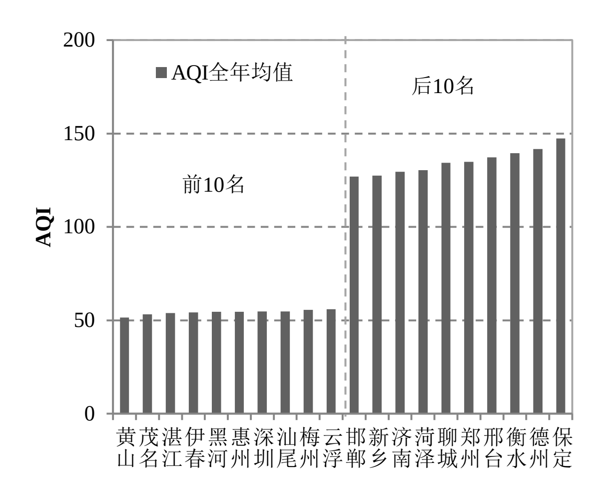


图 1 城市空气质量排名情况

资料来源：作者绘制。

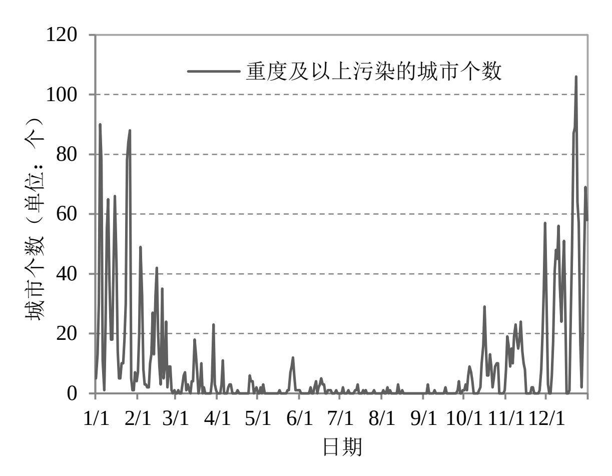


图 2 全部城市样本重度及以上污染城市个数

资料来源：作者绘制。

从城市大气污染状况看，在 10 个城市群全部 245 个城市样本中，年度 AQI 高于全部样本均值（91）的有 93 个城市，占全部城市样本的 37.96%；低于全部样本均值的有 152 个，占全部城市样本的 62.04%。此外，在全部 245 个城市样本中，城市年度 AQI 均值位于 100 之下（空气质量达标）的城市有 192 个，其他城市均位于 100~150（轻度污染）。从空气质量排名看（图 1），在全部 245 个城市样本中，空气质量排名前 10 位的城市依次是黄山、茂名、湛江、伊春、黑河、惠州、惠州、深圳、汕尾、梅州、云浮，它们的年度 AQI 均位于 50~60 之间。而空气质量垫底的 10 个城市依次是保定、德州、衡水、邢台、郑州、聊城、菏泽、济南、新乡、邯郸，在上述城市中，4 个属于京津冀城市群、4 个属于山东城市群、2 个属于中原城市群。对于十大城市群的中心城市（表 1 中的最后三列），空气质量排在前三位的分别是广州、重庆、上海，垫底的是北京、济南、郑州。此外，广州、重庆、上海、太原、西安的 AQI 全年均值低于 100，而武汉、沈阳、北京、济南和郑州的全年 AQI 位于 100~150 之间。从城市大气污染的时间变化规律上看（图 2），重度及以上污染天气主要出现在 1 月、2 月和 12 月，最为严重的是 2015 年 12 月 23 日，在全部 245 个城市样本中，有 106 个城市出现了重度及以上污染天气。12 月当中，平均每天有 36 个城市的大气污染达到重度及以上污染级别，因此全年当中冬季大气污染的防控压力是最大的。

四、城市群内部视角下城市大气污染的空间传导网络

根据大气污染传导的 VAR 模型以及格兰杰因果检验思想，我们对十大城市群内部城市 AQI 序列两两之间进行了因果关系检验，按照 5%的显著性水平来确定空间传导关系并建立了二值关系矩阵。对于每个城市群，本文以其所辖城市作为节点，以上述传导关系作为连线，分别构建十大城市群内部城市大气污染的空间传导网络。表 2 报告了大气污染空间传导网络的整体结构特征。

表 2 十大城市群内部大气污染的空间传导网络结构特征

城市群	城市数	理论关系数	实际关系数	网络密度	网络关联度	网络等级度	网络效率
京津冀	13	156	108	0.6923	1	0.1538	0.0303
长三角	55	2970	1574	0.5300	1	0	0.1349
珠三角	21	420	303	0.7214	1	0	0.0158

成　渝	18	306	199	0.6503	1	0.2105	0.0515
长中游	35	1190	803	0.6748	1	0	0.0214
山　东	30	870	494	0.5678	1	0	0.1133
东　北	35	1190	657	0.5521	1	0	0.1925
中　原	17	272	188	0.6912	1	0	0
关　中	10	90	80	0.8889	1	0	0.0278
晋　中	11	110	73	0.6636	1	0	0.0222
全样本	245	59780	27364	0.4577	1	0	0.2672

资料来源：作者测算绘制。

根据网络密度的测度结果（表 2 和图 4），在十大城市群内部，城市大气污染的空间传导网络均具有较高的网络密度，其中，关中城市群的网络密度最大，接近 0.90；而京津冀、珠三角、成渝、长中游、中原、晋中城市群的网络密度也超过了 0.60，山东、东北、长三角城市群的网络密度也达到 0.50 以上，即使网络密度最小的长三角城市群，其网络密度值仍高达 0.53，也就是说在长三角城市群内部大气污染的城市间实际传导关系占到理论关系数的 53%。这一结论表明在十大城市群内部，城市大气污染的空间传导具有较高的局部影响力，换言之，城市群内部大气污染的空间传导网络已成为造成城市群大气污染的重要原因之一。从全部城市样本看， 245 个城市大气污染的空间传导网络密度为 0.4577，这一数值远低于十大城市群内部大气污染的空间传导网络密度，由此表明，虽然城市群划分边界被打破，但当前大气污染更倾向于在同一个城市群内部的城市之间形成大气污染传导关系，这为在城市群内部建立大气污染联防联控机制提供了实证依据。

下面进一步考察网络关联度、网络等级度和网络效率。①网络关联度。从网络关联度的测算结果看，虽然不同城市群内部所包括的城市数量存在较大差异，但城市群大气污染的空间传导网络关联度均为 1，这表明面对大气污染，处于城市群当中的任何一个城市都不能“独善其身”，均受到来自城市群内部其他城市以及它们构成的空间传导网络的影响。同时，全部 245 个城市样本大气污染空间传导的网络关联度也为 1，这进一步说明当前中国大气污染问题已成为所有城市共同面对的困境，虽然部分城市群内部已实施了大气污染联防联控机制，如京津冀、长三角和珠三角，但上述机制并不能从根本上有效治理十大城市群大气污染空间传导网络的影响，换言之，局部的大气污染治理并不能从根本上解决整体的大气污染问题，建立城市群之间的大气污染联防联控机制尤显紧迫。②网络等级度。除京津冀和成渝城市群的网络等级度分别为 0.1538、0.2105 之外，其他城市群的网络等级度均为

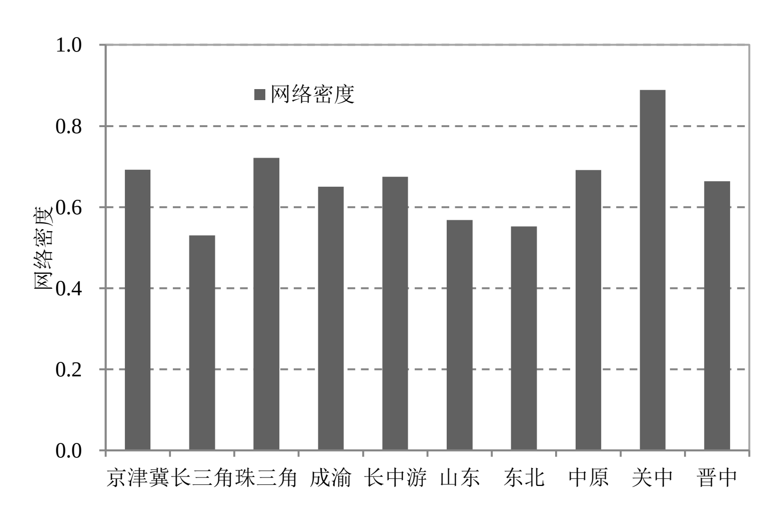


图 4 十大城市群内部城市大气污染传导的网络密度

资料来源：作者测算绘制。

0。这表明除上述两个城市群之外，其他城市群内部大气污染的空间传导具有直接或者间接的相互影响特征。换言之，在城市群内部，任何一个城市与其他城市之间均存在相互的大气污染传导关系。此外，全部 245 个城市大气污染空间传导的网络等级度也为 0，这进一步表明城市大气污染的空间传导已不仅仅局限于地理临近城市之间，而是呈现出多线程、多城市、跨地区的大气污染空间分布态势。为此，在局域大气污染已经实施联防联控的基础上，谋求多中心、跨区域的大气污染联防联控十分关键。③网络效率。网络效率越低，则城市群内部大气污染的空间传导网络中不只存在唯一的城市间大气污染传导关系，而是存在多个传导关系，表明城市间大气污染的空间传导呈现出明显的多重叠加现象。全部 245 个城市大气污染空间传导的网络效率为 0.2672，十大城市群内部的网络效率均低于这一数值，这表明单个城市群内部大气污染空间传导的多重叠加现象更为严重。为此，应先在各个城市群内部建立城市联防联控机制，在此基础上逐步扩大到城市群之间，进而构建一个多中心、多层次、跨区域的大气污染联防联控组织体系以形成更强的治污合理，实现空气质量的协同改善。

五、城市群之间大气污染的动态交互影响

1. 十大城市群大气污染的空间传导及其网络结构特征

采用同样的方法，我们根据十大城市群之间的空间传导关系，以城市群作为节点构建了十大城市群大气污染的空间传导网络，我们利用 Netdraw 工具绘制了对其进行了可视化，如图 5 所示。根据图 5 可以直观的发现，大气污染在十大城市群之间也呈现出多线程的复杂网络结构形态。

借助社会网络分析工具并经过测算，十大城市群之间大气污染空间传导的网络密度为 0.5889，这表明虽然城市群在空间地理距离方面存在较大差异，但是十大城市群大气污染空间传导关系数已超过全部可能传导关系的一半以上，大气污染在城市群之间存在非常紧密的空间关联。同时，网络关联度为 1，这表明十大城市群均不能孤立于网络而独立存在，均受到大气污染空间传导网络的影响。进一步分析发现，十大城市群大气污染空间传导的网络等级度为 0，表明城市群之间的大气污染传导关系也具有直接或者间接的相互影响特性，进一步表明建立跨区域、多城市群的大气污染联防联控机制是非常必要的。而十大城市群大气污染空间传导的网络效率为 0.0833，表明在城市群之间大气污染的空间传导网络中不只存在唯一的传导关系而是存在多个传导关系，同城市之间的传导一样，城市群间大气污染的空间传导网络也呈现出多重叠加现象，强化了网络稳定性，建立多中心、多层次、跨区域的城市群大气污染联防联控机制的任务十分紧迫。

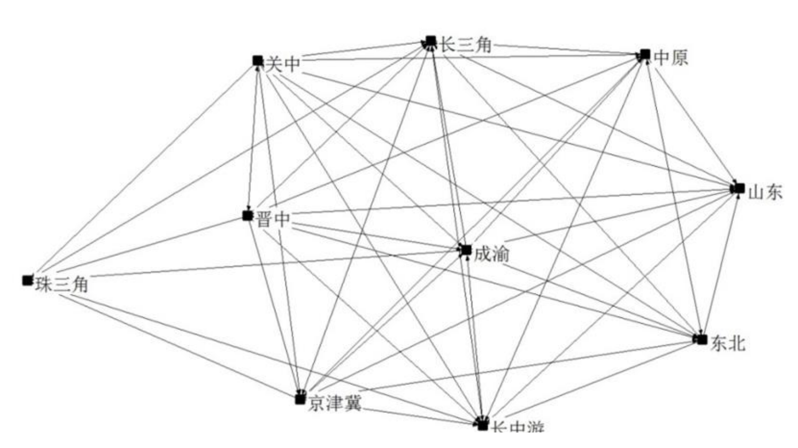


图 5 十大城市群大气污染的空间传导网络结构

资料来源：作者利用 UCINET 的可视化工具 Netdraw 绘制。

根据城市群大气污染空间传导网络的个体中心性测度结果（表 3），发出关系最多的是晋中和关中两个城市群，它们对其他 8 个城市群均具有空间传导关系，而长三角、珠三角和长中游等三个城市群的发出关系最少，仅为 2 个。从接收关系的数量看，长三角和长中

游城市群是接收关系数最多的两个城市群，接收数量分别为 9 个和 8 个，而晋中城市群的接收关系数最小，接收数量仅为 2 个。综合发出和接收关系两个方面可以发现，长三角、珠三角两个城市群在大气污染空间传导网络中易受到其他城市群大气污染的影响，而晋中城市群则作为主要的大气污染空间传导关系的发出者，在大气污染空间网络中更容易对其他城市群产生影响。

表 3　　十大城市群大气污染空间传导网络的中心性

城市群	发出关系	接收关系	标准化出度	标准化入度	度数中心度	接近中心度	中介中心度
京津冀	7	5	77.78	55.56	100	100	1.39
长三角	2	9	22.22	100	100	100	1.39
珠三角	2	4	22.22	44.44	66.67	75.00	0
成　渝	7	4	77.78	44.44	100	100	1.39
长中游	2	8	22.22	88.89	100	100	1.39
山　东	4	6	44.44	66.67	88.89	90.00	0
东　北	4	5	44.44	55.56	88.89	90.00	0
中　原	7	5	77.78	55.56	88.89	90.00	0
关　中	9	5	100	55.56	100	100	1.39
晋　中	9	2	100	22.22	100	100	1.39
均　值	5.3	5.3	58.89	58.89	93.33	94.50	0.833

资料来源：作者测算绘制。

根据标准化出度和入度的测算结果，大气污染较为严重的京津冀城市群向外发出的关系数较高，仅次于关中和晋中城市群，同时接收到其他城市群大气污染的空间传导关系也相对较高，紧随长三角、长中游、山东三大城市群之后，这从某种程度上表明，京津冀城市群的大气污染不仅仅局限于城市群内部，更多的是受到城市群之间大气污染空间传导网络的影响。从度数中心度和接近中心度的测算结果中可以发现，京津冀、长三角、成渝、长中游、关中和晋中等六个城市群是在城市群大气污染空间传导网络中处于核心位置。而中介中心度计算结果也进一步证明，以上六大城市群在城市群大气污染空间传导网络中不仅处于中心位置，而且还扮演“中介”和“桥梁”角色，对调节城市群大气污染的空间传导关系将起到重要作用。为此，当前城市群大气污染联防联控机制中，应首先建立以上述六大城市群为中心的跨区域大气污染联防联控机制，并在此基础上，充分发挥京津冀、长三角、成渝、长中游、关中和晋中等六大城市群在大气污染空间传导网络中的中介作用，减少大气污染的空间传导网络对城市群大气污染联防联控成效的影响。

2. 十大城市群大气污染的广义脉冲响应

广义脉冲响应函数能够避免变量排序对分析结果的干扰，能够将 VAR 模型所包含的经济意义较为完整而细致地表达出来，准确反映响应的强弱程度、正负方向、调整时滞和稳定过程等信息。下面本文采用广义脉冲响应函数从初始响应（滞后 1 期）、短期累计响应（滞后 1-3 期累计）、长期累计响应（滞后 1-10 期累计）三个层面揭示十大城市群之间大气污染的动态交互影响。

表 4　　十大城市群之间大气污染的广义脉冲初始响应

城市群	京津冀	长三角	珠三角	成　渝	长中游	山　东	东　北	中　原	关　中	晋　中
京津冀	**32.8837**	5.3117	2.8080	4.9674	4.3266	16.5778	10.8556	11.3398	14.7320	20.1378
长三角	2.8665	**17.7461**	2.8500	2.1876	8.5505	8.0524	2.5034	4.4533	4.0436	1.1811
珠三角	0.9400	1.7678	**11.0074**	0.8143	2.0214	1.8105	0.5555	0.9228	0.7194	0.6169
成　渝	2.2695	1.8521	1.1115	**15.0240**	4.7374	1.6258	1.6701	2.9754	5.0184	2.4814
长中游	1.7925	6.5643	2.5019	4.2959	**13.6237**	3.6259	2.0682	2.9873	4.2071	1.3033
山　东	13.2182	11.8972	4.3126	2.8374	6.9781	**26.2196**	7.6150	11.2153	5.4711	5.5837
东　北	8.6751	3.7071	1.3263	2.9212	3.9894	7.6321	**26.2785**	0.3604	3.6749	4.2943
中　原	9.2225	6.7113	2.2422	5.2965	5.8641	11.4396	0.3667	**26.7439**	8.7292	11.6056
关　中	8.3042	4.2236	1.2114	6.1914	5.7240	3.8678	2.5922	6.0501	**18.5359**	9.9797
晋　中	11.4771	1.2474	1.0504	3.0954	1.7929	3.9911	3.0626	8.1328	10.0903	**18.7413**

注：表中数据代表行对列的响应速度。

资料来源：作者测算并绘制。

（1）初始响应。表 4 报告了十大城市群之间大气污染的广义脉冲初始响应结果。表 4 对角线数值表示城市群对自身大气污染变化的响应，观察其数值可以发现，它们在每一行中均高于该行其他数值，由此说明，从初始响应看，尽管城市群之间的交互影响存在一定差异，但均对自身大气污染变化的响应最大，因此大气污染的治理应当首先集中于城市群内部，在此基础上发挥城市群之间的协同效应。下面重点考察京津冀、长三角和珠三角城市群大气污染的初始响应（表 4 中的第 2-4 行）。①京津冀。京津冀大气污染对自身的响应速度达到了 32.8837；除此之外，晋中、山东、关中、中原、东北等城市群也对京津冀大气污染表现出较强的冲击效应，尤其是晋中，京津冀对其响应速度达到了 20.1378；而珠三角对京津冀的冲击效应最小，后者对前者的响应速度仅为 2.8080。②长三角。长三角大气污染对自身的响应速度达到了 17.7461；同时，长中游、山东等城市群也对长三角表现出较强的冲击效应；而晋中对长三角的冲击效应最小，长三角对其响应速度仅为 1.1811。③珠三角。珠三角大气污染对自身的响应速度达到 11.0074，长中游、山东等城市群也对珠三角表现出较强的冲击效应；而东北对珠三角的冲击效应最小，珠三角对其响应速度仅为 0.5555。此外，从其它城市群的广义脉冲初始响应看，来自自身的冲击都是最大的，但城市群之间也表现出较强的冲击效应，如关中、长中游对成渝；长三角、成渝、关中对长中游；京津冀、长三角、中原对山东；京津冀、山东、晋中对东北；晋中、山东、京津冀对中原；晋中、京津冀、成渝对关中；京津冀、关中、中原对晋中。

表 5　　　　　　　　十大城市群大气污染之间的广义脉冲短期累计响应

城市群	京津冀	长三角	珠三角	成　渝	长中游	山　东	东　北	中　原	关　中	晋　中
京津冀	**77.4108**	7.4186	2.7088	18.2605	6.8278	34.1820	31.0487	31.8610	52.6978	67.2316
长三角	17.9664	**39.0437**	11.6262	11.6911	19.9184	27.7281	12.0429	17.3521	14.6693	12.7508
珠三角	5.3089	5.6611	**30.1350**	7.3635	9.9503	6.6449	2.6358	2.4197	4.3662	3.7287
成　渝	11.6377	7.1869	2.7986	**43.3273**	15.0570	6.9589	6.6404	7.4316	21.5477	12.9116
长中游	8.9175	19.5031	11.6049	19.6467	**36.2672**	14.3495	6.7254	16.4235	16.6043	10.5953

山　东	46.1099	23.9552	11.5391	12.6266	12.7858	**55.2074**	23.5650	27.2854	29.6775	35.7180
东　北	22.0605	4.3774	3.2383	10.6178	6.6442	15.0522	**53.9483**	5.9156	15.9255	19.7319
中　原	42.6398	20.5670	8.9251	22.3205	16.4456	32.0764	16.2055	**57.6620**	48.6237	50.6377
关　中	24.7163	14.4432	3.9670	21.9149	16.1620	13.4535	9.8854	19.5493	**53.7710**	33.9908
晋　中	29.0025	5.0318	0.8539	12.5774	6.8518	9.3990	12.8791	18.8877	35.6409	**48.4838**

注：表中数据代表行对列的响应速度。

资料来源：作者测算并绘制。

（2）短期累计响应。表 5 报告了十大城市群大气污染的广义脉冲短期累计响应结果。同初始响应一致，表 5 对角线数值在每一行中均高于该行其他数值，由此说明，从短期累计响应看，每个城市群对自身大气污染变化的响应与该城市群对其他城市圈的响应相比都是最大的。同样的，我们仍集中考察京津冀、长三角和珠三角城市群与其他城市群之间的短期累计响应情况（表 5 中的第 2-4 行）。①京津冀。从京津冀的广义脉冲短期响应看，受自身的影响最大，京津冀对自身冲击的短期累计响应达到了 77.4108；晋中、关中、山东、中原、东北等城市群对京津冀大气污染也表现出较强的冲击效应，尤其是晋中，京津冀对其短期累计响应达到 67.2316；而珠三角对京津冀大气污染的影响最小，京津冀对珠三角的短期累计响应仅为 2.7088。②长三角。从长三角的广义脉冲短期响应看，同样受自身的冲击最大，长三角对自身冲击的短期累计响应为 39.0437；此外，山东、长中游等城市群对长三角大气污染表现出较强的冲击效应；而珠三角对长三角大气污染的影响最小，长三角对其短期累计响应仅为 11.6262。③珠三角。从珠三角的广义脉冲短期响应看，自身影响也是最大的，对自身的短期累计响应为 30.1350；此外，长中游、成渝等城市群也对珠三角表现出较强的冲击效应；而中原城市群对珠三角的影响最小，珠三角对其短期累计响应仅为 2.4197。此外，从其它城市群大气污染的广义脉冲短期累计响应看，最大的影响均来源于城市群内部，但城市群之间也表现出较强的冲击效应，如关中、长中游对成渝；成渝、长三角、关中对长中游；京津冀、晋中、关中对山东；京津冀、晋中、关中对东北；晋中、关中、京津冀对中原；晋中、京津冀、成渝对关中；关中、京津冀、中原对晋中。

表 6　　　　　　　　十大城市群之间大气污染广义脉冲的长期累计响应

城市群	京津冀	长三角	珠三角	成　渝	长中游	山　东	东　北	中　原	关　中	晋　中
京津冀	**94.7584**	25.4344	11.6496	43.4480	13.1947	54.1315	46.5845	59.4687	71.9635	101.8371
长三角	24.8828	**48.4527**	18.7435	36.2423	34.8159	36.2953	18.6979	28.7179	27.6803	28.4142
珠三角	4.9964	7.2716	**47.8920**	23.2075	23.5852	11.2608	6.7632	2.5807	-0.5391	-0.1226
成　渝	25.0371	20.0612	12.8079	**87.0653**	40.2536	21.8398	15.1112	16.5150	35.2840	32.9384
长中游	24.5138	32.3929	27.7166	55.0480	**61.8448**	31.7743	16.6425	32.6111	33.6836	31.0499
山　东	54.3050	34.0874	19.6734	29.4549	16.2501	**68.9812**	31.9910	44.3557	46.4080	59.9585
东　北	29.8795	15.8264	10.8442	26.8908	19.6479	22.2026	**69.9801**	23.1855	26.3814	39.9324
中　原	62.2357	40.9823	17.2939	55.2836	27.1428	54.3876	32.9796	**84.8003**	72.6408	83.6430
关　中	41.8430	31.1927	8.5503	47.7000	28.3245	32.4171	20.3230	38.9944	**72.4433**	62.9927
晋　中	44.4916	17.6931	-1.1163	30.8919	9.8830	21.8862	23.9933	37.2159	49.9997	**77.6053**

注：表中数据代表行对列的响应速度。

资料来源：作者测算并绘制。

（3）长期累计响应。表 6 报告了十大城市群之间大气污染广义脉冲的长期累计响应结果。从长期累计响应看，除了晋中城市对京津冀的长期影响（101.8371）略高于京津冀自身影响（94.7584）之外，每个城市群对自身大气污染变化的响应与该城市群对其他城市圈的响应相比都是最大的。①京津冀。从京津冀广义脉冲的长期累计响应看，相比其他城市群，长期中晋中城市群对京津冀大气污染的冲击是最大；除此之外，关中、中原、山东、东北等城市群也对京津冀大气污染表现出较强的冲击效应；珠三角在长期中对京津冀的冲击效应仍然是最小的，京津冀对其长期累计响应仅为 11.6496。②长三角。从长三角大气污染广义脉冲长期累计响应看，长三角受到来自自身的冲击最大，长期累计响应达到了 48.4527；此外，山东、成渝、长中游等城市群也对长三角表现出较强长期累计影响；而东北对长三角的长期累计影响最小，长三角对东北的长期累计响应仅为 18.6979。③珠三角。从珠三角的广义脉冲累计响应看，对自身的长期累计响应最大，达到 47.8920；此外，长中游、成渝、山东等城市群对珠三角大气污染表现出较强的冲击效应；而关中城市群对珠三角的冲击效应最小，珠三角对其长期累计响应仅为-0.5391。最后，从其它城市群大气污染的广义脉冲长期累计响应看，长期中城市群大气污染受自身影响都是最大的，但城市群之间也表现出较强的冲击效应，如长中游、关中、晋中对成渝；成渝、关中、中原对长中游；晋中、京津冀、关中对山东；晋中、京津冀、成渝对东北；晋中、关中、京津冀对中原；晋中、成渝、京津冀对关中；关中、京津冀、中原对晋中。

综合广义脉冲初始响应、短期累计响应和长期累计响应结果，可以发现，除了长期中晋中对京津冀之外，多数情况下城市群大气污染对自身的冲击效应都是最大的，与此同时，无论是初始、短期还是长期，大气污染在十大城市群之间普遍存在较强的动态交互影响效应，这进一步为在城市群之间建立跨区域的大气污染联防联控体系提供了实证依据。

3. 城市群之间大气污染交互影响的方差分解

方差分解能够将任一内生变量的预测方差基于自身及其它变量的冲击进行分解并给出贡献度，从而进一步刻画每个城市群大气污染受到来自自身及其它城市群大气污染的影响情况。下面本文运用方差分解实证考察十大城市群之间大气污染的交互影响。表 7 报告了滞后 1-10 期十大城市群大气污染方差分解平均值结果。表 7 对角线数值表示城市群对其自身大气污染的贡献度，观察其数值容易发现，它们在每一行中均高于该行其他数值，由此说明，城市群大气污染既受到自自身的影响又存在城市群之间的交互影响，而前者的贡献要远高于后者，这一结论与广义脉冲响应函数的结果基本保持一致。特别地，从京津冀的预测方差看，它对自身大气污染的平均贡献度高达 78.4089%，除此之外，晋中、关中、山东、东北对京津冀大气污染的预测方差也具有较大贡献，尤其是晋中城市群，平均贡献度达到了 13.2564%，而珠三角对京津冀的平均贡献度最小，仅为 0.2306%。从长三角大气污染的预测方差看，自身平均贡献度高达 75.3040%，除此之外，山东、成渝、关中、晋中对长三角大气污染的预测方差也具有较大贡献，而东北城市群对长三角的平均贡献度最小，仅为 0.4625%。从珠三角大气污染的预测方差看，自身平均贡献度高达 86.3371%，成渝、长中游、关中对珠三角大气污染存在一定的贡献，而东北对珠三角的平均贡献度最小，仅为 0.1031%。从其它城市群大气污染的预测方差看，自身因素的平均贡献度最大，城市群之间的贡献度也不容忽视，如晋中、关中、长中游对成渝；成渝、中原、珠三角、晋中对长中游；京津冀、晋中、关中、中原对山东；晋中对东北，晋中、关中、成渝对中原；晋中、成渝、山东对关

中；关中、中原对晋中等。方差分解结果进一步表明，自身因素是造成十大城市群大气污染的主要原因，但其它城市群大气污染对其也具有较强影响。基于上述结论，大气污染的治理要首先在城市群内部建立起有效的联防联控，但仅仅在单个城市群内部实施大气污染联防联控是不够的，考虑到大气污染在城市群之间存在较强的空间交互影响，因此跨城市群的联防联控势在必行。

表 7　　十大城市群大气污染的方差分解结果

城市群	京津冀	长三角	珠三角	成　渝	长中游	山　东	东　北	中　原	关　中	晋　中
京津冀	**78.4089**	0.8866	0.2306	0.6102	1.0484	1.3763	1.1111	0.6033	2.4682	13.2564
长三角	2.1420	**75.3040**	1.0934	4.4047	1.6034	7.1193	0.4625	1.7485	3.2825	2.8397
珠三角	0.4685	0.7929	**86.3371**	4.3660	4.1955	0.2272	0.1031	0.7611	2.6085	0.1402
成　渝	0.1146	0.2040	0.1197	**90.7909**	1.1583	0.7328	0.0479	0.6448	2.9568	3.2300
长中游	0.4003	0.3531	2.5082	12.7690	**75.8160**	0.7302	0.0118	3.3037	1.9271	2.1806
山　东	11.9312	0.3995	0.4406	0.7341	0.7719	**70.5743**	0.3750	1.6143	2.6180	10.5412
东　北	0.8943	1.0838	0.1915	0.6595	0.3509	0.4590	**87.3512**	1.0994	0.5089	7.4015
中　原	1.1782	0.4544	0.1580	2.4896	0.6458	0.9711	1.4549	**64.0633**	9.7132	18.8715
关　中	0.2825	0.9090	0.0034	2.8965	0.1223	2.1321	0.1605	0.5266	**87.9963**	4.9707
晋　中	0.3506	1.0766	0.3352	1.2357	0.4098	0.5662	1.4509	1.6977	5.8625	**87.0148**

注：表中数据代表列对行的贡献度；方差分解过程中依据变量相关系数由大到小排序。

资料来源：作者测算并绘制。

六、全局视野下大气污染联防联控体系创新

城市群内部大气污染的城市间存在的密切联系及传导关系为单个城市群开展大气污染的联防联控提供了科学上的实证依据。面对大气污染的城市间传导网络，在一个城市群内部，没有哪个城市的空气质量能够“独善其身”，即使某个城市做出了治理大气污染的努力，在短期内尽管可能会使当地的空气质量略有好转，然而大气污染空间传导网络将很快抵消它所做出的努力。因此，对于单个城市来，必须要站在整个城市群的角度重新审视大气污染问题，通过与城市群内部其他城市之间开展全方位、多层次的联防联控才能有效改善本地空气质量。

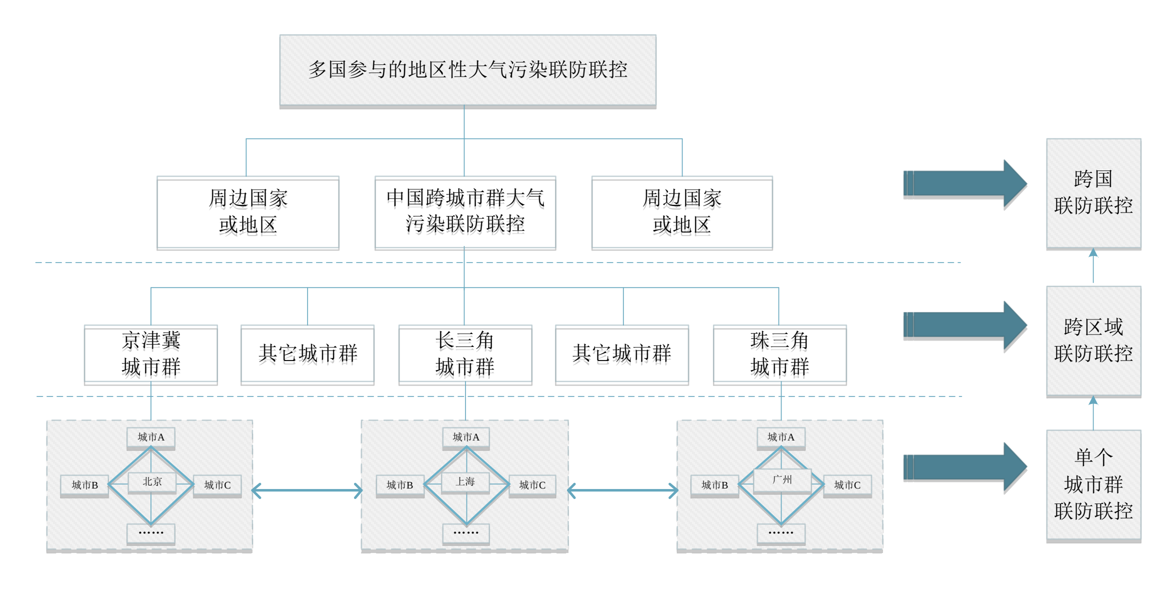


图 6 多中心、多层次、跨区域的大气污染联防联控体系

资料来源：作者绘制。

当前，中国在构建大气污染联防联控机制上已经开展富有成效的探索，2010 年 5 月，环保部等 9 部门出台《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知》，首次提出中国将在重点区域开展大气联防联控工作，从国家层面开启了中国大气污染治理从“各自为战”格局到区域性联防联控的新局面，此后，2012 年 9 月国务院批复了《重点区域大气污染防治“十二五”规划》成为中国第一部综合性大气污染防治规划。2013 年 9 月国务院发布了《大气污染防治行动计划》，成为中国有史以来力度最大的空气清洁行动。京津冀、长三角、珠三角三大地区已经初步构建区域性的大气污染联防联控机制。从京津冀地区来看，2013 年，为加快京津冀及周边地区大气污染综合治理，环保部、发改委、工业和信息化部、财政部、住房城乡建设部、能源局联合，依据《大气污染防治行动计划》，印发《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》，正式启动了京津冀地区大气污染联防联控。目前京津冀及周边地区已经建立了区域信息共享、空气质量预报预警视频会商及应急联动、机动车排放污染控制、联动执法等工作机制。从长三角地区来看，2014 年，由长三角三省一市（江苏省、浙江省、安徽省、上海市）和国家八部委组成的长三角大气污染协作机制正式启动，建立了会议协商、分工协作、共享联动、科技协作、跟踪评估五个工作机制，并成立长三角区域大气污染防治协作小组和区域大气污染防治协作专家小组，印发《长三角区域落实大气污染防治行动计划实施细则》，建立区域大气环境监测信息共享平台、大气重污染应急联动和重污染天气应急响应体系，基本形成了长三角区域重点污染整体应急方案，建立和完善了污染预警会商研判机制。从珠三角地区来看，2006 年，广东省政府与科技部签署省部合作协议，启动了 863 重大项目——重点城市群大气复合污染防治技术与集成示范，选择珠江三角洲城市群作为核心示范区，在全国率先建立大气污染联防联控技术示范区，组建了覆盖区域的大气环境质量监测预警网络，形成了区域空气质量管理体系等运行机制。2014 年建立了珠三角区域大气污染防治联席会议制度，广佛肇（广州、佛山和肇庆）、深莞惠（深圳、东莞和惠州）、珠中江（珠海、中山和江门）三个经济圈分别签订圈内大气污染联防联控合作协议。

城市群之间大气污染的交互影响，则为从更大空间范围内构建跨城市群的大气污染联防联控提供了科学依据。在城镇化战略加速实施的现实背景下，未来不仅城市群内部城市之间的联系更

为密切，而且不同城市群之间的联系也将逐步加强，城市连片发展已经成为必然趋势。“不谋全局者，不能谋一域”，对于区域大气污染，要尽快树立“站在城市群看城市”、“站在全国看城市群”、“站在全球看中国”的大气污染全局意识，从更大格局重新审视区域大气污染问题，加快构建一个以城市群核心城市为中心的、“城市-城市群-地区”不同层次协同的跨区域大气污染联防联控体系（图 6），在更大的空间范围内实现大气污染的协同治理和空气质量的协同改善。①从城市和城市群层面，要依托城市群发展战略，在城市群内部加快推进以城市群核心城市为中心的大气污染联防联控。目前，除了京津冀、长三角和珠三角城市群已经建立起大气污染联防联控机制之外，近期山东省的济南市联合省内其它 6 个地级市签署了大气污染联防联控协议，启动了山东省省会城市群大气污染的联防联控工作。而大气污染比较严重的长江中游、成渝、东北、关中、中原也应尽快启动城市群内部的大气污染联防联控。在此基础上，发挥城市群之间的协同效应，从整体上实现大气污染的协同治理。②从国家和地区层面，要在京津冀、长三角、珠三角以及其它城市群大气污染联防联控的基础上，加快实现城市群之间大气污染联防联控的对接，从而在更大的空间范围内实现大气污染的联防联控。比如，可以通过京津冀向北联接东北城市群，向南向西联接山东、关中以及中原城市群；通过山东城市群连接京津冀和长三角；通过长江中游、成渝城市群联接起长三角和珠三角，从而构建起基本覆盖全部城市群的全国性的大气污染联防联控机制，实现大气污染更大空间的协同治理。③在建立起全国性的大气污染联防联控的同时，要积极地域周边国家或地区进行大气污染联防联控的合作，建立一个多边的、跨国的大气污染联防联控机制。比如，中国可以和韩国、日本围绕大气污染的联防联控开展合作，因为新近研究表明，中国的大气污染对于韩国和日本的空气质量产生影响[25-26]。当然，除了考虑邻近关系之外，由于大气污染的空间传导在更远的距离也是存在的，已有研究也表明中国和美国之间也存在大气污染的空间传导[27-28]。因此，在双边或多边参与的前提下，要继续拓展大气污染联防联控区域边界，吸收更多国家加入到这一机制中来，形成一个地区性甚至是全球性的大气污染联防联控网络。

七、结论与展望

伴随城市规模的不断扩张，区域内城市连片发展，在大气环流及大气化学的双重作用下，区域间大气污染相互影响愈发明显，区域性大气环境污染问题日益突出，给大气污染有效防治提出了严峻挑战，按照行政区域边界的环境管理模式与大气污染的区域性特征之间矛盾不断加剧，仅从行政区划的角度考虑单个城市大气污染防治的“各自为战”的环境管理和污染治理模式已经难以有效解决当前愈加严重的区域大气污染问题[29]，亟须打破行政区划限制，采取联防联控措施，创新大气污染联防联控体系以形成跨区域治污合力势在必行。本文基于京津冀、长三角、珠三角、成渝、长中游、山东、东北、中原、关中、晋中等 10 个城市群 245 个城市 2015 年空气质量指数（AQI）日报数据，将时间序列计量技术与社会网络分析方法相结合揭示城市大气污染的空间传导及其网络结构特征，并利用广义脉冲响应函数和方差分解技术实证考察了大气污染在城市群之间的动态交互影响。研究发现，大气污染在城市群内部和城市群之间均具有多线程的空间传导关系且呈现出联系紧密的复杂网络结构形态，受此网络结构的影响，谋求多中心、跨区域的大气污染联防联控组织体系尤显关键。城市群大气污染主要来源于城市群内部，与此同时大气污染在城市群之间也存在较强的交互影响。

当前，城市群内部大气污染的空间传导网络影响已成为造成城市群大气污染的重要原因之一，在城市群内部建立大气污染的联防联控机制是各个城市群解决当前大气污染问题的科学选择。然

而，由于中国大气污染问题已成为考察样本中所有城市共同面对的困境，同时考虑到大气污染在城市群之间的动态交互影响，局部的大气污染治理并不能从根本上解决全国大气污染问题，建立城市群之间的大气污染联防联控机制尤显紧迫。由于中国城市大气污染的空间传导已不仅仅局限于地理临近城市之间，而是呈现出多线程、多城市、跨地区的大气污染空间态势。为此，在建立全局城市群之间的大气污染联防联控的基础上，构建一个以城市群核心城市为中心的、“城市-城市群-地区”不同层次协同的跨区域大气污染联防联控体系，是一个实现中国大气污染协同治理和空气质量协同改善的可行路径。然而，要确保大气污染联防联控机制取得成效，仍面临诸多困难。尽管在大气污染空间传导网络中，没有哪个城市能够“独善其身”，然而要落实好城市间、城市群之间、国家之间的联防联控，首先要求所有个体要“独善其身”，即要求网络中的任一城市、城市群、国家或地区要首先做好自身的大气污染治理，否则在缺少一个协调机制和考核机制的条件下，多个个体之间最终博弈的结果是没有哪个城市愿意做出更多的污染防治努力，毕竟治理大气污染改善空气质量要付出经济上的代价，最终将会降低联防联控的效果。因此，未来的研究中，亟需对大气污染联防联控机制中个体行为和博弈关系进行深入探究，以确保联防联控获得成效。此外，大气污染联防联控是基于空间协同的思路，强调的“联”，在一定程度上仍是“治标不治本”的一种措施，而要确保空气质量的彻底改善，最根本的途径是要尽快转变生产和生活方式，加快实现绿色发展，换言之，绿色发展是大气污染治理与空气质量改善的必经之路和最终选择。

附录：

京津冀包括北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水等13个城市。长三角包括上海、南京、苏州、无锡、常州、扬州、镇江、南通、泰州、徐州、连云港、淮安、盐城、宿迁、吴江、昆山、常熟、张家港、太仓、句容、江阴、宜兴、金坛、溧阳、海门、嘉兴、绍兴、舟山、温州、金华、衢州、台州、杭州、宁波、湖州、丽水、临安、富阳、义乌、合肥、芜湖、马鞍山、蚌埠、淮南、淮北、铜陵、安庆、黄山、滁州、阜阳、宿州、六安、亳州、池州、宣城等55个城市。珠三角包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州、肇庆、韶关、汕头、湛江、茂名、梅州、汕尾、河源、阳江、清远、潮州、揭阳、云浮等 21 个城市。成渝包括重庆、成都、绵阳、宜宾、攀枝花、泸州、自贡、德阳、南充、遂宁、内江、眉山、广安、达州、资阳、广元、雅安、巴中等18个城市。长中游包括武汉、宜昌、荆州、黄石、鄂州、孝感、十堰、荆门、随州、黄冈、咸宁、长沙、岳阳、株洲、湘潭、常德、张家界、衡阳、邵阳、益阳、郴州、永州、怀化、娄底、南昌、九江、新余、鹰潭、赣州、吉安、宜春、抚州、上饶、景德镇、萍乡等 35 个城市。山东包括济南、青岛、淄博、枣庄、烟台、潍坊、济宁、泰安、日照、东营、聊城、滨州、菏泽、威海、莱芜、临沂、德州包括沈阳、大连、鞍山、瓦房店、抚顺、本溪、丹东、营口、盘锦、葫芦岛、锦州、阜新、辽阳、铁岭、朝阳、长春、吉林、四平、辽源、通化、白山、松原、白城、哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、牡丹江、鸡西、鹤岗、双鸭山、伊春、佳木斯、七台河、黑河、绥化等 35 个城市。中原城市群包括郑州、洛阳、安阳、开封、焦作、平顶山、三门峡、鹤壁、许昌、南阳、信阳、周口、新乡、濮阳、漯河、商丘、驻马店等 17 个城市。关中城市群包括西安、咸阳、铜川、延安、宝鸡、渭南、汉中、榆林、安康、商洛等 10 个城市。晋中城市群包括太原、大同、长治、临汾、阳泉、晋城、朔州、晋中、运城、忻州、吕梁等11个城市。

［参考文献］

[1]张庆丰，Crooks. 迈向环境可持续的未来：中华人民共和国国家环境分析[M]. 中国财政经济出版社，2012.
[2]薛文博，付飞，王金南. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学，2014，(6)：1361-1368.

[3]安俊岭，李健，张伟. 京津冀污染物跨界输送通量模拟[J]. 环境科学学报，2012，（11）：2684-2692.

[4]胡晓宇，李云鹏，李金凤. 珠江三角洲城市群 PM_{10} 的相互影响研究[J]. 北京大学学报（自然科学版），2011，(3)：519-524.

[5]Qin, M., X. Wang, Y. Hu, X. Huang, L. He, L. Zhong, and Y. Zhang. Formation of Particulate Sulfate and Nitrate over the Pearl River Delta in the Fall: Diagnostic Analysis Using the Community Multiscale Air Quality Model[J]. Atmospheric Environment, 2015, 112: 81-89.

[6]李小飞，张明军，王圣杰. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学，2012，（6）：1936-1943.

[7]马丽梅，张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J]. 中国工业经济，2012，（4）：19-31.

[8]Wang, H., M. Xue, and X.Y. Zhang. Mesoscale Modeling Study of the Interactions between Aerosols and PBL Meteorology during a Haze Episode in China Jing-Jin-Ji and Its Near Surrounding Region-Part 1: Aerosol Distributions and Meteorological Features[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2014, (14): 31675-31717.

[9]Yang, N., D. Ji, and S. Li. The Application of Pearson Correlational Analysis Method in Air Quality Analysis of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(3): 590-593.

[10]Hu, J., Y. Wang, Q. Ying, and H. Zhang. Spatial and Temporal Variability of $PM_{2.5}$ and PM_{10} over the North China Plain and the Yangtze River Delta[J]. China Atmospheric Environment, 2014, 95: 598-609.

[11]任婉侠，薛冰，张琳. 中国特大型城市空气污染指数的时空变化[J]. 生态学杂志，2013，（10）：2788-2796.

[12]李婕，腾丽. 珠三角城市空气质量的时空变化特征及影响因素[J]. 城市观察，2014，（5）：85-95.

[13]伍复胜，管东生. 城市间大气污染相互影响的 VAR 模型分析[J]. 环境科学与技术，2015，（6）：57-61.

[14]Ying, L. Understanding China’s Recent Growth Experience: A Spatial Econometric Perspective[J]. Annals of Regional Science, 2003, (37): 613-628.

[15]潘文卿. 中国的区域关联与经济增长的空间溢出效应[J]. 经济研究，2012，（11）：54-65.

[16]李敬，陈澍，万广华，付陈梅. 中国区域经济增长的空间关联及其解释[J]. 经济研究，2014，（11）：4-16.

[17]刘华军，刘传明，孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济，2014，（5）：83-95.

[18]刘华军，张耀，孙亚男. 中国区域发展的空间网络结构及其时滞变化—基于 DLI 指数的分析[J]. 中国人口科学，2014，（4）：60-70.

[19]刘华军，刘传明，杨骞. 环境污染的空间溢出及其来源—基于网络分析视角的实证研究[J]. 经济学家，2015，（10）：28-35.

[20]Freeman, L. The Development of Social Network Analysis[M]. Vancouver: Empirical Press, 2004.

[21]Oliveira, M., and J. Gama. An Overview of Social Network Analysis[J], Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2012, 2(2), 99-115.

[22]Scott, J. Social Network Analysis: A Handbook (3rd edition) [M]. London: Sage Publication, 2013.

[23]罗家德. 社会网络分析讲义[M]. 北京：社会科学文献出版社，2010.

[24]刘军. 整体网分析[M]. 上海：格致出版社，2014.

[25]Oh, H.R., C.H. Ho, J. Kim, D. Chen, S. Lee, Y.S. Choi, and C.K. Song. Long-range Transport of Air Pollutants Originating in China: A Possible Major Cause of Multi-day High-PM_{10} Episodes during Cold Season in Seoul, Korea[J]. Atmospheric Environment, 2015, 109: 23-30.

[26]Takashima, H., H. Irie, Y. Kanaya, and H. Akimoto. Enhanced NO_2 at Okinawa Island, Japan Caused by Rapid

Air-mass Transport from China as Observed by MAX-DOAS[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(15): 2593-2597.

[27]Ngo, N.S., X. Bao, and N. Zhong. Evaluating the Impacts of Transboundary Air pollution from China on Air Quality in the US Using a Regression Framework[C]. In AGU Fall Meeting Abstracts, 2014, Vol. 1.

[28]Ngo, N. The Environmental and Health Impacts of Transboundary Air Pollution from China to the US[C]. In 2015 Fall Conference: The Golden Age of Evidence-Based Policy, Appam, 2015, November.

[29]Bai, X., P. Shi, and Y. Liu, Society: Realizing China's Urban Dream[J]. Nature, 509(7499): 158-160.

Urban Air Pollution's Spatial Transmission Network and Dynamic Interaction among Urban Agglomerations

LIU Hua-jun[1], CHEN Ming-hua[1], SUN Ya-nan[2], LIU Chuan-ming[1]

（1. School of Economics, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China;

2. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China）

Abstract: Regional characteristics of air pollution pose serious challenges for effective prevention and control of air pollution, it is imperative to form cross-regional forces through innovating air pollution joint control systems. From time-series viewpoint and based on air quality index (AQI) daily data of 245 cities of 10 urban agglomerations in 2015, this paper empirically study the spatial transmission of air pollution and its network structure and the dynamic interaction of air pollution among urban agglomerations. The results show that air pollution among cities and inter-urban agglomerations has multiple threads spatial transmission relationships and presents complex network structure. Because of the impact of the network structure, it is particularly critical to construct multi-center, cross-regional joint prevention and control system of air pollution. Main sources of air pollution among urban agglomerations are from its own, while there is strong interaction among urban agglomerations. Based on the conclusions, the paper puts forward an idea to innovate air pollution joint control system, that is multilevel and cross-regional joint control mechanism which has the major city of urban agglomerations as the core and presents muli-level of "cities-urban agglomerations-regions". These measures can provide organizational guarantee to cross-regional cooperative governance of air pollution.

Keywords: air pollution; spatial transmission network; dynamic interaction; urban agglomeration